

Г. Н. Бузук

НОВЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ СРЕДЫ ДЛЯ АМПЛИТУДНО-ОПТИМУМНЫХ ШКАЛ**Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет**

Предложен простой алгоритм расчета уровня экологических факторов по экологическим шкалам Л. Г. Раменского, в основе которого лежит нахождение точки пересечения линий трендов для верхней и нижней амплитуд экологических факторов. Предложен вариант нахождения недостающих значений шкал посредством экстраполяции и интерполяции значений верхней и нижней амплитуд факторов относительно богатства (проективного покрытия) вида в сообществе с помощью линейной регрессии. Показана возможность перехода от исходных (базовых) амплитудно-оптимумных к амплитудным и оптимумным (точечным) шкалам, соответственно.

Ключевые слова: экологические шкалы, линейная регрессия, метод пересечения линий трендов, Л. Г. Раменский.

ВВЕДЕНИЕ

Все многообразие экологических шкал, которых в настоящее время опубликовано более двадцати, по характеру представляемой информации можно разделить на три основных типа: оптимумные шкалы, когда для каждого вида указывается только точка экологического оптимума; амплитудные (иначе интервальные, или медианные) шкалы, где указываются пределы толерантности вида, и амплитудно-оптимумные, для которых, наряду с амплитудой толерантности вида по фактору, приводятся также значения его обилия в сообществе [1].

При сравнении амплитудных экологических шкал Д. Н. Цыганова [2], амплитудно-оптимумных шкал Л. Г. Раменского [3] и оптимумных (точечных) шкал Элленберга или Ландольта [4, 5] прослеживается общая тенденция сужения амплитуды толерантности видов растений от максимального (шкалы Д. Н. Цыганова [2] и Я. П. Дидука [6]) до частичного (амплитудно-оптимумные шкалы Л. Г. Раменского [3]), вплоть до замены амплитуды толерантности точечной оценкой фактора в условиях оптимума (максимального обилия) вида (шкалы Элленберга, Ландольта [4, 5]). Таким образом, наблюдаются две противоположные тенденции в разработке экологических шкал, при этом амплитудно-оптимумные шкалы находятся в центре.

Ранее нами был предложен новый способ расчета уровня экологических факторов с использованием линейной регрессии для амплитудных шкал Д. Н. Цыганова [7–9], в основе которого лежит расчет линейной

регрессии по верхней и нижней амплитуде толерантности видов относительно их диапазона толерантности. Данный способ требует наличия как верхней, так и нижней амплитуд фактора. Вместе с тем, в наиболее известных амплитудно-оптимумных шкалах Л. Г. Раменского [3] для целого ряда видов отсутствуют значения верхней или нижней амплитуд, что не позволяет рассчитать диапазон толерантности и, соответственно, линейную регрессию.

В связи с этим, целью настоящей работы явилось разработка нового, более совершенного алгоритма расчета значений экологических факторов для амплитудно-оптимумных шкал Л. Г. Раменского.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основные принципы методики расчета были отработаны на примере геоботанического описания (таблица 1) [10]. В качестве экологического фактора рассматривали влажность местообитания. Для расчетов и визуализации полученных результатов использовали Excel и Matlab.

При ручном расчете по методу ограничительных ступеней Л. Г. Раменского амплитуды фактора сортируются: нижняя в порядке возрастания, верхняя – в порядке убывания (таблица 2). Затем, просматривая отсортированные амплитуды экологического фактора, находят максимально близкие значения для верхней и нижней амплитуд. В нашем примере это соответствует значению фактора увлажнения **75** (таблица 2, выделено цветом). Следовательно, местообитание данного

сообщества характеризуется как влажно-луговое [3].

Определение режима фактора местобитания, таким образом, сводится к установлению точки пересечения векторов его верхней и нижней амплитуд (рисунок 1). За-

метим, кстати, что в дополнение к данному способу автором экологических шкал Л. Г. Раменским был предложен и ручной графический метод, особенно для случаев отсутствия пересечения рядов ограничительных ступеней верхней и нижней амплитуд [3].

Таблица 1 – Амплитуды для влажности луговых видов болотномятликового-луговолосохвостового сообщества по экологическим шкалам Раменского и Цыганова [10]

№ п/п	Виды	Раменский		Цыганов		dxR	dxZ	PP%
		y1R	y2R	y1Z	y2Z			
1	<i>Alopecurus pratensis</i> L.	66	77	7	19	11	12	35
2	<i>Poa palustris</i> L.	87	90	9	19	3	10	40
3	<i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) P.Beauv	66	89	9	19	23	10	1
4	<i>Agrostis canina</i> L.	78	95	7	21	17	14	2,5
5	<i>Carex praecox</i> Schreber	48	86	3	21	38	18	0,3
6	<i>Trifolium pratense</i> L.	55	77	5	17	22	12	3,5
7	<i>Rhinanthus vernalis</i> (N. Zing.) Schischk. et Serg.	49	70	7	19	21	12	5
8	<i>Ranunculus repens</i> L.	72	92	11	19	20	8	1,5
9	<i>Cnidium dubium</i> (Schkuhr) Thell.	77	99	11	19	22	8	3,5
10	<i>Leontodon autumnalis</i> L.	54	74	7	15	20	8	2,5
11	<i>Viola canina</i> L.	61	69	9	15	8	6	3
12	<i>Thalictrum lucidum</i> L.	63	95	11	19	32	8	0,3
13	<i>Lychnis flos-cuculi</i> L.	60	98	11	19	38	8	0,2
14	<i>Centaurea jacea</i> L.	55	72	9	17	17	8	1,5
15	<i>Potentilla anserina</i> L.	58	90	3	19	32	16	0,2
16	<i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.	18	100	9	20	82	11	0,1
17	<i>Galium uliginosum</i> L.	57	97	11	19	40	8	0,2
18	<i>Carex vulpina</i> L.	75	100	11	21	25	10	0,1
19	<i>Carex leporina</i> L.	64	87	9	19	23	10	0,2
20	<i>Galium boreale</i> L.	58	75	7	15	17	8	0,1
21	<i>Ranunculus acris</i> L.	53	98	7	19	45	12	0,1
22	<i>Lysimachia vulgaris</i> L.	76	106	11	21	30	10	0,1

Примечание: y1 и y2 – нижняя и верхняя амплитуды фактора, dxR и dxZ – диапазон толерантности для шкал Л. Г. Раменского и Д. Н. Цыганова (dxR = y2R-y1R, dxZ = y2Z-y1Z), PP% – обилие видов (проективное покрытие).

Таблица 2 – Создание ряда ограничительных ступеней для шкалы Раменского

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
y1	66	87	66	78	48	55	49	72	77	54	61	63	60	55	58	18	57	75	64	58	53	76
y2	77	90	89	95	86	77	70	92	99	74	69	95	98	72	90	100	97	100	87	75	98	106

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
y1	18	48	49	53	54	55	55	57	58	58	60	61	63	64	66	66	72	75	76	77	78	87
y2	106	100	100	99	98	98	97	95	95	92	90	90	89	87	86	77	77	75	74	72	70	69

Для автоматизированных расчетов нами предлагается следующий алгоритм. Сначала по отсортированным векторам верхней и нижней амплитуд фактора строятся линии трендов, используя линейную регрессию. Затем по найденным значениям коэффициентов регрессии (наклон линии тренда и пересечения с осью ординат) находят координаты точки пересечения

линий трендов по формулам:

$$\begin{aligned} xx &= (a2 - a1) / (b1 - b2); \\ yy &= b1*(a2 - a1) / (b1 - b2) + a1; \end{aligned} \quad (1)$$

где a1, a2, b1, b2 – коэффициенты регрессии ($y1 = b1*x + a1$; $y2 = b2*x + a2$) для линий трендов, xx и yy – координаты точки пересечения трендов.

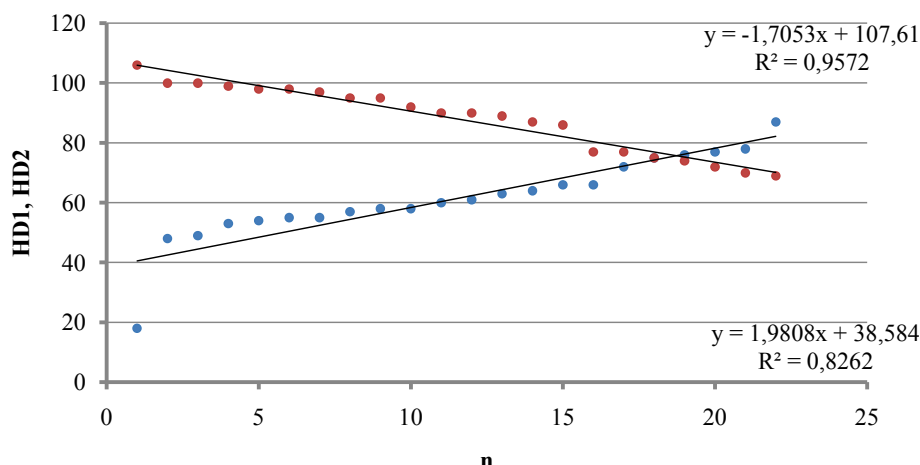


Рисунок 1 – Пересечение линий трендов для верхнего (HD2) и нижнего (HD1) диапазонов влажности видов местообитания, ранжированных (n) по их величине:
 $y = b \cdot x + a$ – уравнение регрессии, R^2 – коэффициент детерминации

В результате проведенных расчетов получаем значения $x = 18,7$, $y = 75,7$ соответственно. Оно достаточно близко к значению режима фактора, полученному ручным способом – **75** (см. выше).

Близкое значение получается также и при использовании регрессионного способа определения режима фактора (рисунок 2).

Его значение составляет **78,3**. Разница в рассчитанных значениях, вероятнее всего, связана с точностью аппроксимации при построении линий трендов. Она может быть повышена при использовании для аппроксимации вместо простой линейной регрессии робастной, гребневой или байесовской, устойчивых к наличию выбросов в данных.

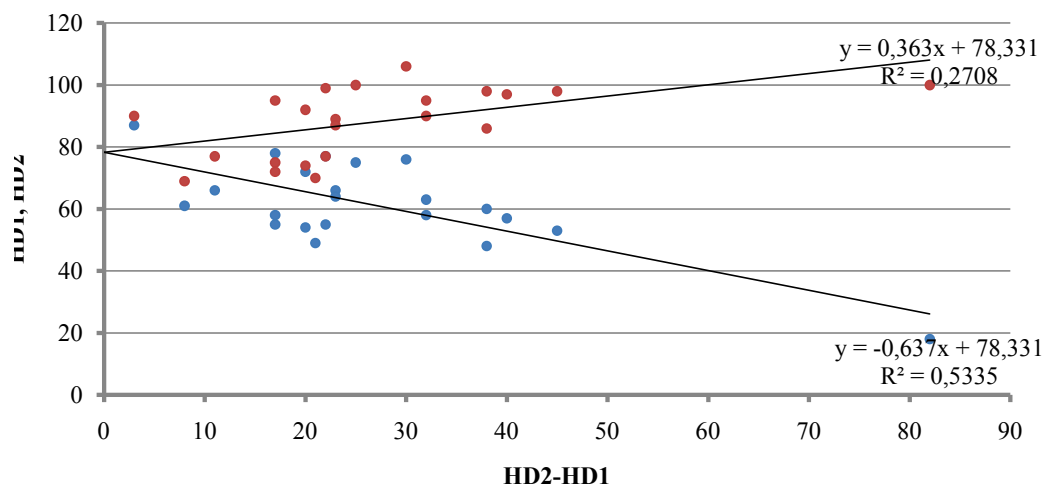


Рисунок 2 – Расчет значений режима фактора увлажнения с помощью линейной регрессии [7–9] по шкалам Раменского

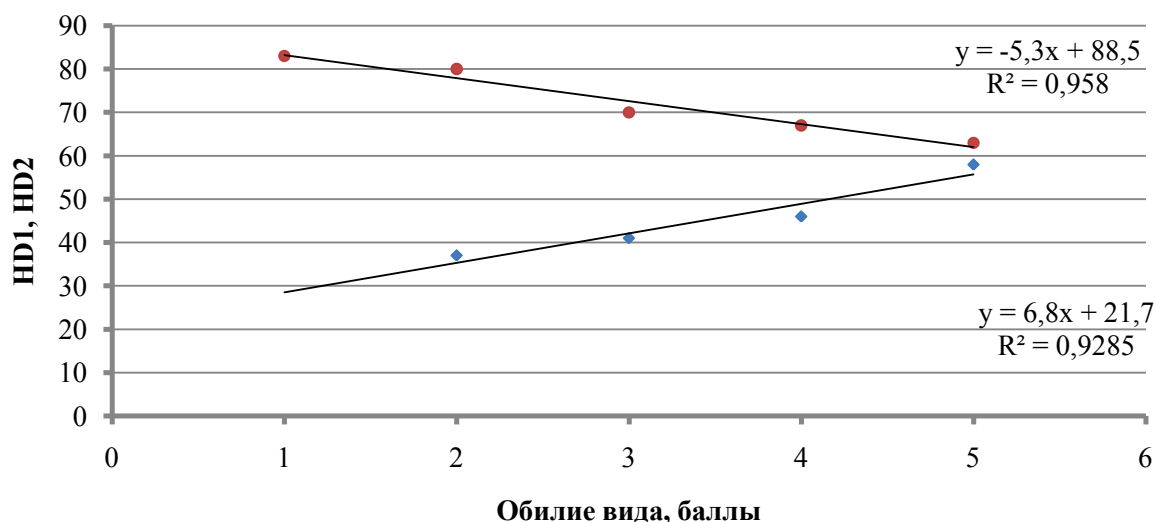
Как уже отмечалось ранее, в шкалах Л. Г. Раменского для целого ряда видов имеются ограничения, с одной стороны, только для верхних или только для нижних значений амплитуды шкалы. В этом случае при расчетах экологических условий местообитаний посредством пересечения линий трендов один из трендов по-

сле сортировки получается короче. Режим фактора рассчитывают по коэффициентам этих трендов по уравнению 1 или же недостающее значение амплитуды заменяют парой рядом стоящих значений амплитуд с иным, как правило, меньшим обилием вида. При невозможности такой корректировки вид исключают из обработки.

Другой возможный вариант преодоления недостающих значений и пропусков в шкалах Л. Г. Раменского, который предлагается нами, заключается в построении линий трендов для верхней и нижней амплитуд относительно обилия конкретного вида. Такого рода график представлен на рисунке 3 для тысячелистника обыкновенного (*Achillea millefolium* L.). Из рисунка 3 видно, что имеет место практически ли-

нейная зависимость между верхней и нижней амплитудами увлажнения для *Achillea millefolium* L. и его обилием. Недостающее значение нижней амплитуды увлажнения для обилия 1 может быть найдено путем экстраполяции линии тренда (линейной регрессии) или подстановкой в уравнение для нижнего тренда значения 1:

$$y = 6,8 \cdot x + 21,7 = 6,8 \cdot 1 + 21,7 = 28,5 \quad (2)$$



Обилие вида, баллы: 1 – единично; 2 – мало: 0,1–0,2%; 3 – умеренно: 0,3–2,5%; 4 – обильно: 2,5–8%; 5 – массово: более 8% [3]

Рисунок 3 – Зависимость увлажнения для верхней (HD2) и нижней (HD1) амплитуд от обилия (проективного покрытия) *Achillea millefolium* L.

Дальнейшая интерпретация графика на рисунке 3 может быть следующей. Продление линии трендов до пересечения с осью ординат дает максимальные значения верхней и нижней амплитуды фактора увлажнения, которые равны ($x = 0$, вид отсутствует) или очень близки ($x > 0$, вид присутствует в незначительном количестве) к свободному члену уравнений трендов, в нашем примере, соответственно, **88,5** и **21,7**. Эти значения аналогичны верхней и нижней амплитуде уровня фактора для вида в амплитудных шкалах, например, Д. Н. Цыганова. В то же время точка пересечения линий трендов дает уровень фактора при максимальном обилии вида (в нашем случае – **59,2**), что аналогично оптимуму или точечной оценке фактора для оптимумных шкал, например Элленберга.

Таким образом, для амплитудно-оптимумных шкал имеется возможность восполнения недостающих значений

шкал путем интерполяции или экстраполяции. Кроме того, появляется возможность на основе амплитудно-оптимумных шкал создавать амплитудные и оптимумные шкалы, а также сопоставлять и сравнивать различные шкалы посредством их масштабирования, сжатия или растяжения.

При использовании экологических шкал Д.Н. Цыганова [2] ручной метод расчета Л. Г. Раменского дает следующий результат (таблица 3, рисунок 4).

Как можно видеть из таблицы 3 и рисунка 4, пересечение линий трендов векторов верхней и нижней амплитуд фактора в пределах имеющихся значений отсутствует. Точка пересечения может быть найдена путем экстраполяции линий трендов с помощью уравнения 1. Ее координаты составляют $x_x = 28,4$ и $y_y = 14,5$. Таким образом, найденный уровень влажности составляет **14,5**, что соответствует сыроватолесолуговому увлажнению [2].

Таблица 3 – Создание ряда ограничительных ступеней для шкалы Д. Н. Цыганова

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
y1	7	9	9	7	3	5	7	11	11	7	9	11	11	9	3	9	11	11	9	7	7	11
y2	19	19	19	21	21	17	19	19	19	15	15	19	19	17	19	20	19	21	19	15	19	21

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
y1	3	3	5	7	7	7	7	7	7	9	9	9	9	9	9	11	11	11	11	11	11	11
y2	21	21	21	21	20	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	17	17	15	15	15

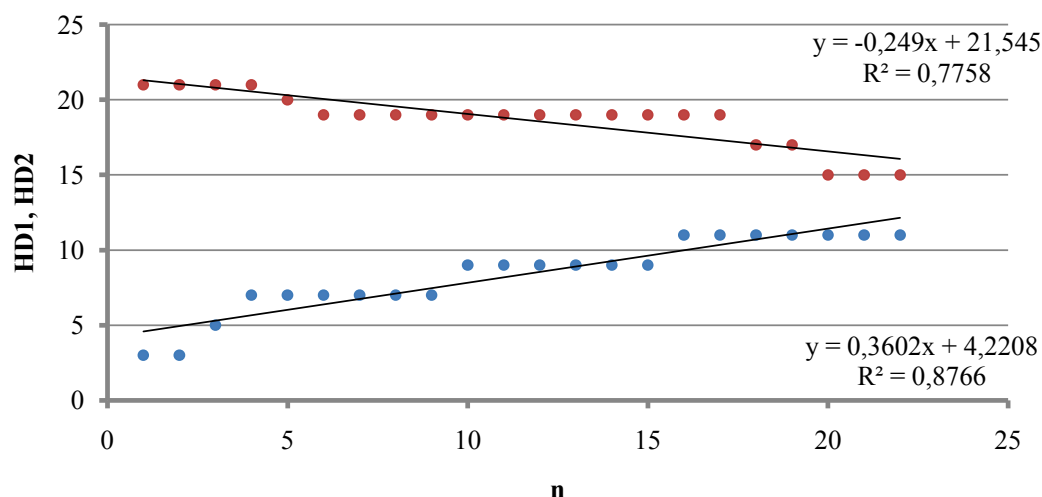


Рисунок 4 – Пересечение линий трендов для верхней и нижней амплитуд фактора для шкал Д. Н. Цыганова

При использовании регрессионного способа определения режима фактора (рисунок 5) значение влажности составляет **15,3**, что соответствует сыроватолесолугловому увлажнению.

Для расчетов значений фактора Д.Н. Цыганов [2] предлагает метод средневзвешенной (на обилие видов сообщества) середины

интервала. Формула расчета следующая:

$$\text{sum}(((y1+y2)/2) \cdot PP) / \text{sum}(PP) \quad (3),$$

где y1 и y2 – вектора верхней и нижней амплитуд фактора, PP – проективное покрытие или другой параметр, характеризующий обилие вида в сообществе, sum – сумма.

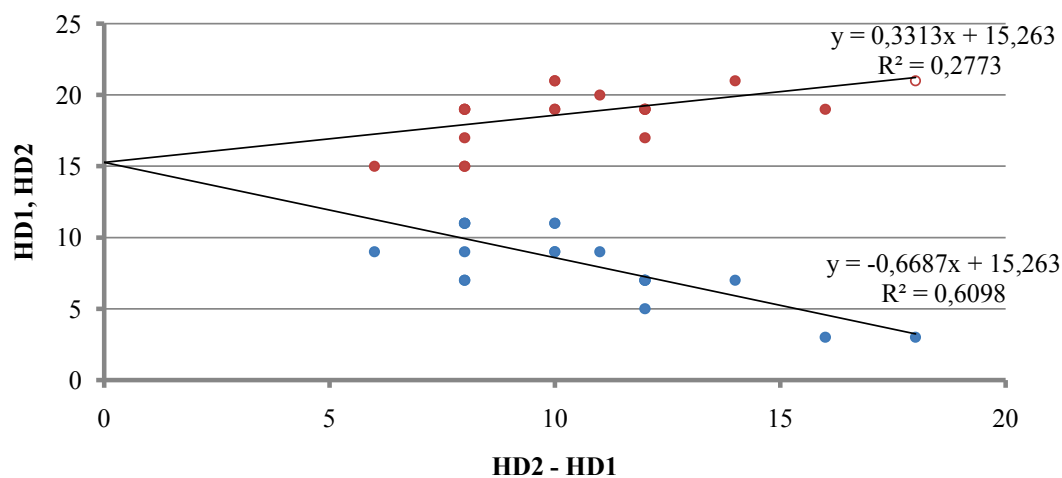


Рисунок 5 – Расчет значений режима фактора увлажнения с помощью линейной регрессии по шкалам Д. Н. Цыганова

Полученное значение влажности, взвешенное на проективное покрытие, составляет **13,4**, что соответствует влажнолесолуговому увлажнению. Расчет без взвешивания на обилие видов дает уровень влажности **13,5**. Таким образом, корректирующее влияние обилия видов при расчете режима фактора при использовании амплитудных шкал сравнительно небольшое и находится в пределах 0,1 градации шкалы.

Аналогичная ситуация имеет место и при использовании амплитудных экологических шкал Я. П. Дидука [6].

Основным недостатком, который приписывается определению режима экологических факторов при использовании амплитудных шкал и средневзвешенной середины (медианы) интервала толерантности, является невозможность получения при вычислении балловой оценки биотопа краевых значений шкалы. Имеет место эффект "сжатия" шкалы биотопов (по сравнению со шкалой для видов), который связан с тем, что большинство видов сообщества имеют широкую амплитуду. Чем больше таких видов, тем значительнее смещение балловой оценки биотопа к центру шкалы, при этом смещение оказывается несимметричным. Несимметричность смещения объясняется преобладанием в сообществе видов с широкой амплитудой [11–13]. Такое «сжатие» шкалы биотопа не может быть исправлено взвешиванием на обилие видов.

Более того, как отмечает сам автор экологических шкал Д. Н. Цыганов [2], данный прием фитоиндикации по средневзвешенной середине интервала толерантности непригоден в экстремальных и близких к ним типах режимов факторов.

Этого лишен предложенный нами регрессионный способ оценки режима экологических факторов местообитаний растений [7–9], который позволяет получить оценку биотопа при краевых значениях амплитудных шкал, например, для сосняков багульниковых и сфагновых и даже позволяет выявлять лимитирующие состав фитоценоза факторы [8–9].

Фитоиндикация требует хорошего знания флоры, а также биологических и экологических свойств растений каждо-

го вида, что существенно ограничивает круг лиц для ее использования. Индикация теряет смысл, если индикационные исследования по трудоемкости и продолжительности наблюдения приближаются к прямым методам определения факторов [10]. Но она может дать направление для дальнейшего изучения роли определенных экологических факторов в строении и функционировании растительных сообществ. Несомненным достоинством фитоиндикации является то, что растения дают обобщенные и усредненные характеристики экологических режимов в силу значительной инерции в ответной реакции на изменение тех или иных параметров среды, т.е. отзываются на продолжительные, обобщенные, усредненные и направленные изменения режима, а не на его кратковременные флуктуации. На кратковременные изменения условия среды растения реагируют изменением (флуктуациями) биомассы.

Фитоиндикационная оценка экологического пространства распространяется на территорию, в пределах которой описан видовой состав растений. Это может быть учетная площадка, пробная площадь, выдел, ассоциация, тип леса, например. При этом с увеличением задействованной площади растет точность определения за счет увеличения числа видов, но одновременно растет неопределенность режима факторов в конкретной точке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый, более совершенный алгоритм расчета уровня экологических факторов по экологическим шкалам Л. Г. Раменского, в основе которого лежит нахождение точки пересечения линий трендов для верхней и нижней амплитуд экологических факторов. Предложен вариант нахождения недостающих значений шкал посредством экстраполяции и интерполяции значений верхней и нижней амплитуд факторов относительно богатства (проективного покрытия) вида в сообществе с помощью линейной регрессии. Показана возможность перехода от исходных (базовых) амплитудно-оптимумных к амплитудным и оптимумным (точечным) шкалам, соответственно.

SUMMARY

G. N. Buzuk

**A NEW ALGORITHM FOR
CALCULATING OF ENVIRONMENTAL
ECOLOGICAL FACTOR REGIMES
FOR AMPLITUDE-OPTIMUM SCALES**

A simple algorithm for calculating the ecological factor level has been proposed according to L. G. Ramenski's ecological scales based on finding the cross point of trend lines for upper and lower amplitudes of ecological factors. An alternative of finding the scales missing values by extrapolation and interpolation of values of upper and lower amplitude factors regarding the species wealth (projective cover) in the community using linear regression has been proposed. The possibility of transfer from original (basic) amplitude-optimum to amplitude and optimum (dotted) scales, respectively, has been shown.

Keywords: environmental scales, linear regression, the cross of trend lines, L. G. Ramenski.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев, А. А. Сравнительный анализ растительности с использованием фитоиндикационных шкал / А. А. Зверев // Сборник статей и лекций IV Всероссийской школы-конференции «Актуальные проблемы геоботаники» (1–7 октября 2012 г.). – Уфа: Издательский центр «МедиаПринт», 2012. – С. 25–46.

2. Цыганов, Д. Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов / Д. Н. Цыганов // М.: Наука. 1983. – 196 с.

3. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову / Л. Г. Раменский [и др.]. – М.: Сельхозгиз, 1956. – 472 с.

4. Ellenberg, H. Zeigerwerte der Gefasspflanzen Mitteleuropas / H. Ellenberg. – Göttingen: Goltze, 1974. – 97 S.

5. Landolt, E. Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora / E. Landolt // Veröff. Geobot. Inst. der Eidgen. Techn. Hochschule,

Zürich, 1977. Vol. 64. – P. 1–208. 98.

6. Didukh, Ya. P. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication / Ya. P. Didukh // Kyiv: Phytosociocentre, 2011. – 176 p.

7. Бузук, Г. Н. Фитоиндикация: применение регрессионного анализа / Г. Н. Бузук, О. В. Созинов // Вестник фармации. – 2007. – № 3. – С. 44–50.

8. Бузук, Г. Н. Фитоиндикация с применением экологических шкал и регрессионного анализа: экологический индекс / Г. Н. Бузук // Вестник фармации. – 2017. – № 1. – С. 31–37.

9. Бузук, Г. Н. Лимитирующие факторы для фитоценозов: технология оценки (на примере сосновых лесов Центральной Беларуси) / Г. Н. Бузук, О. В. Созинов, Р. В. Цвирко // Социально-экологические технологии (Вестник МГГУ им. М. А. Шолохова). – 2017. – № 1. – С. 27–40.

10. Булохов, А. Д. Экологическая оценка среды методами фитоиндикации / А. Д. Булохов // Брянск: БГПУ, 1996. – 104 с.

11. Оценка и сохранение биоразнообразия лесного покрова в заповедниках европейской России. – М.: Научный мир, 2000. – 196 с.

12. Заугольнова, Л. Б. Информационно-аналитическая система для оценки текущего состояния лесных сообществ / Л. Б. Заугольнова [и др.] // Препринт: Пушкино. – ПНЦ РАН, 1995. – 51 с.

13. Верификация балловых оценок местообитания по некоторым параметрам среды / Л. Б. Заугольнова [и др.] // Лесоведение. – 1998. – № 5. – С. 48–58.

Адрес для корреспонденции:

210023, Республика Беларусь,

г. Витебск, пр. Фрунзе, 27,

УО «Витебский государственный

ордена Дружбы народов

медицинский университет»,

кафедра фармакогнозии

с курсом ФПК и ПК,

тел. раб.: 8 (0212) 64-81-78,

e-mail: buzukg@mail.ru,

Бузук Г.Н.

Поступила 16.09.2017 г.